

ОРБИТАЛЬНЫЕ И ВЕКОВЫЕ РЕЗОНАНСЫ В ДВИЖЕНИИ АСТЕРОИДОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ

Т. Ю. Галушина

Томский государственный университет

Данная работа посвящена орбитальным и вековым резонансам в динамике астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ). Рассмотрены основные резонансные характеристики орбитальных и апсидально-нодальных резонансов, представлена методика их выявления. На примере движения некоторых астероидов показано взаимное влияние резонансов и тесных сближений. Приведен краткий обзор последних исследований динамики АСЗ в окрестности орбитальных и вековых резонансов.

MEAN MOTION AND SECULAR RESONANCES IN THE MOTION OF NEAR-EARTH ASTEROIDS

T. Yu. Galushina

Tomsk State University

The paper deals with mean motion and secular resonances in the near-Earth asteroids' (NEA) dynamics. It is considered main resonance characteristics of mean motion and apsidal-nodal resonances, technique of them determination is presented. We showed the mutual influence of resonances and close approaches on some asteroid motion examples. It is presented a brief review of recent studies of NEA dynamics near mean-motion and secular resonances.

Введение

Движение астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), важно изучать по ряду причин: с практической точки зрения — для решения проблемы астероидной опасности [1, 2], с теоретической — для понимания эволюции Солнечной системы [3]. Динамика АСЗ испытывает существенное влияние таких явлений, как орбитальные и вековые резонансы. При этом в зависимости от различных условий

резонансы могут как стабилизировать орбиту, тем самым предотвращая сближения и столкновения с планетами [4], так и, наоборот, приводить к существенному ее изменению. Прохождения вблизи возмущающих тел, в свою очередь, могут способствовать входу или выходу из резонансов. Рассмотрим эти важные особенности движения более подробно.

Орбитальный резонанс

Орбитальный резонанс представляет собой соизмеримость периодов астероида и большой планеты. Иными словами, можно сказать, что астероид и планета движутся в орбитальном резонансе, если отношения их периодов (или средних движений) близко к отношению целых чисел.

Яркую демонстрацию орбитального резонанса, в частности, представляют астероиды, чьи орбитальные периоды примерно в два раза меньше периода Юпитера. Одним из таких объектов является 437994 2003 UL12 (рис. 1). Перигелий орбиты астероида лежит в окрестности орбиты Земли, а в афелии он пересекает орбиту Юпитера (в проекции на плоскость эклиптики). Очевидно, что единственный способ выжить на такой орбите — избегать сближений с гигантом благодаря резонансу. На рис. 1, а показано положение Юпитера и астероида в момент прохождения им афелия. Резонансный характер движения наиболее наглядно показывает система координат, вращающаяся с угловой скоростью Юпитера. На рис. 1, б представлена орбита астероида на интервале времени примерно 1 000 лет. Юпитер неподвижен, и ясно видно, как рассматриваемый объект избегает встречи с планетой. Здесь и далее во вращающейся системе координат тонкими линиями показаны средние расстояния до планет. Все начальные данные взяты из каталога Э. Боуэлла на июнь 2019 г. [5], вычисления выполнены с помощью программного комплекса ИДА [6, 7]. Использована модифицированная версия, которая позволяет автоматизировать процесс построения графиков и использовать нейронные сети для классификации резонансов.

Перейдем от качественного описания резонанса к количественному. В качестве основных резонансных характеристик традиционно рассматриваются резонансная щель и критический аргумент.

Если существует соизмеримость средних движений астероида и планеты, то конфигурация данной системы характеризуется периодичностью. В этом случае взаимные возмущения, обусловленные

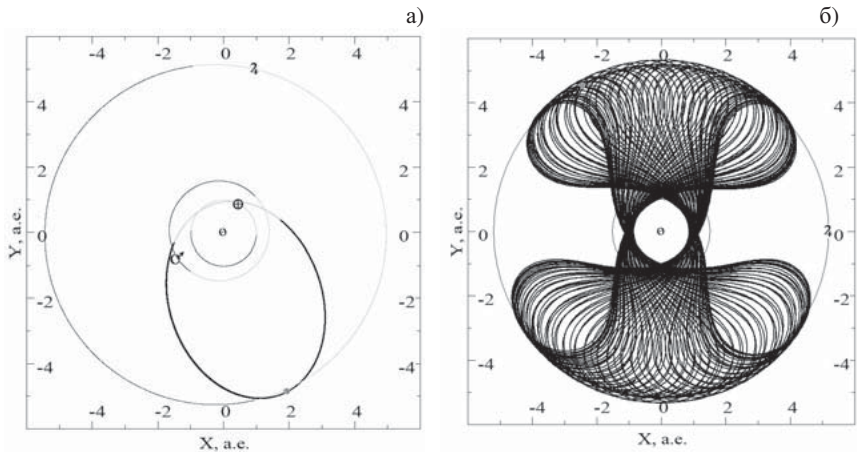


Рис. 1. Астероид 437994 2003 UL12: проекция орбиты астероида и больших планет в неподвижной (а) и вращающейся с угловой скоростью Юпитера (б) системах координат

конфигурацией системы, будут иметь один и тот же период, что усиливает возмущения [8]. Усиление возмущений происходит в момент соединения астероида и планеты, поэтому основным является выражение для долготы соединения, следовательно, критический (резонансный) аргумент будет иметь вид $\beta = k_0\lambda_0 - k_j\lambda_j - (k_0 - k_j)\omega_0 - (k_0 - k_j)\Omega_0$, где λ_0, λ_j — средние долготы астероида и j -й планеты; ω_0 — аргумент перигея астероида; Ω_0 — долгота восходящего узла астероида.

В качестве еще одной резонансной характеристики используется производная критического аргумента — так называемая резонансная щель. Поскольку аргумент перигея и долгота восходящего узла меняются существенно медленнее средней долготы орбиты астероида, то для упрощения их производными можно пренебречь. Согласно работе [9] будем считать, что астероид движется в α -резонансе k_j/k_0 с j -й планетой, если $\alpha = k_0n_0 - k_jn_j$ есть малая величина. Здесь n_0, n_j — средние движения соответственно астероида и j -й планеты, k_0, k_j — целые числа. Величину α будем называть резонансной полосой или «щелью», а под порядком резонанса будем понимать число $k = k_0 + k_j$.

В общем случае удобно первоначальный отбор резонансных объектов осуществлять на основе значений резонансной щели, а потом исследовать поведение критического аргумента для выбранных астероидов. Если аргумент испытывает колебания на всем интервале исследований, то можно говорить о наличии резонанса. В случае циркуляции резонанс отсутствует. Однако возможны и промежуточные варианты, когда циркуляция сменяет либрацию или наоборот. Такое поведение свидетельствует о неустойчивом резонансе.

В случаях когда классификация по критическому аргументу и резонансной щели оказывается неоднозначной, удобно привлекать третью характеристику — так называемый фазовый портрет, а именно орбитальную эволюцию в координатах $e \cos \beta$ и $e \sin \beta$ [3]. Если полученная кривая охватывает начало координат, то мы имеем дело с циркуляцией, в противном случае — с либрацией.

В качестве еще одного примера резонансного движения рассмотрим астероид 2012 US68 (рис. 2). В перигелии он заходит внутрь орбиты Меркурия ($q = 0.11$ а. е.), а в афелии приближается к орбите Юпитера ($Q = 4.90$ а. е.). Резонанс $3/1$ с Юпитером защищает астероид от сближений с планетой. На рис. 3 показаны эволюция резонансной щели (а) и критического аргумента (б), фазовый портрет (в), а также сближения с Меркурием (г), Венерой (д), Землей (е) и Марсом (ж) на интервале времени (-2000 г., 6000 г.). На всем интервале исследования астероид движется в устойчивом орбитальном резонансе, но в будущем тесные сближения с планетами земной группы приводят к увеличению амплитуды либрации резонансных характеристик. Кроме того, 2012 US68 движется в окрестности резонанса $1/4$ с Землей, но не переходит через значение точной соизмеримости, критический аргумент циркулирует; такое резонансное соотношение не может служить защитным механизмом от сближений.

При исследовании движения небесных тел необходимо принимать во внимание такой важный вопрос, как выбор модели сил [10]. Для объектов, подходящих близко к Солнцу, имеет смысл оценить влияние эффекта Ярковского. Согласно нашим исследованиям трансверсальное ускорение, обусловленное действием рассматриваемого эффекта, для 2012 US68 составляет $A_2 = 4.6 \cdot 10^{-13}$ а. е./сут. По алгоритму, приведенному в [11], данное значение соответствует изменению большой полуоси $da/dt = -3.8 \cdot 10^{-3}$ а. е./млн лет. На интервале порядка тысячи лет смещение составит $da/dt = -3.8 \cdot 10^{-6}$ а. е., что находится на пределе точности определения параметров орбиты и

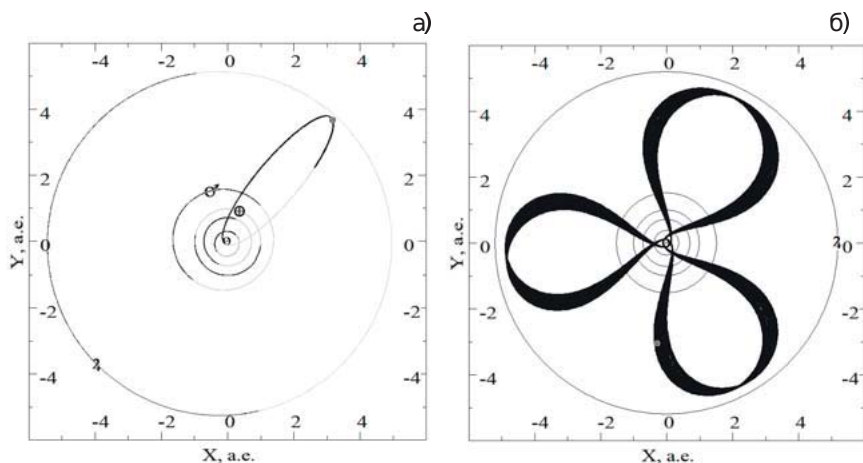


Рис. 2. Астероид 2012 US68: проекция орбиты астероида и больших планет в неподвижной (а) и вращающейся с угловой скоростью Юпитера (б) системах координат

не может существенно повлиять на резонансное поведение астероида. Однако при исследовании долговременной эволюции эффектом Ярковского пренебрегать нельзя.

На рис. 3 примечательно отсутствие сближений в прошлом. Учитывая большой наклон орбиты астероида к эклиптике (25.8°), сближения могут иметь место только в окрестности узлов. На рис. 4 показано расстояние от Солнца до нисходящего (черный цвет) и восходящего (серый цвет) узла орбиты. Нисходящий узел большую часть интервала исследования находится внутри орбиты Меркурия и только около 4 000 года начинает расти и в результате достигает отметки 2.9 а. е., что делает возможным сближения. Иное поведение демонстрирует восходящий узел: сначала он находится около орбиты Юпитера (однако орбитальный резонанс позволяет избежать сближений), затем постепенно перемещается во внутреннюю часть Солнечной системы, что приводит к сближениям с планетами земной группы. Положение узлов орбиты связано с изменениями долготы восходящего узла и аргумента перигелия, что естественным образом заставляет нас обратить внимание на вековые, в частности апсидально-нодальные, резонансы.

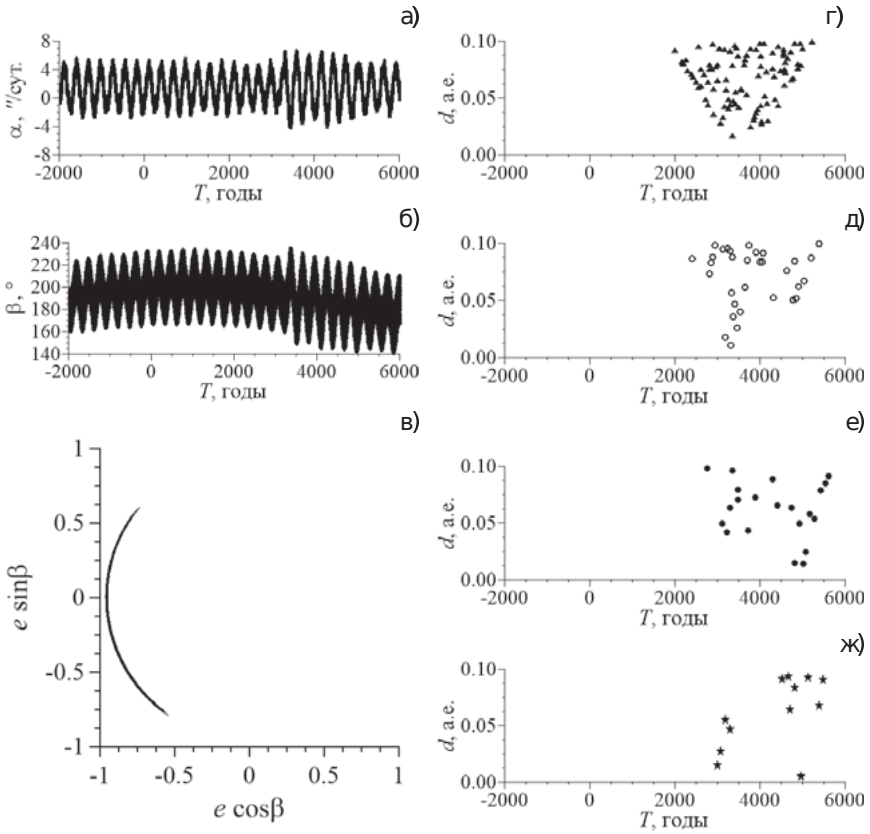


Рис. 3. Астероид 2012 US68: эволюция резонансной щели (а) и критического аргумента (б), фазовый портрет (в), сближения с Меркурием (г), Венерой (д), Землей (е) и Марсом (е)

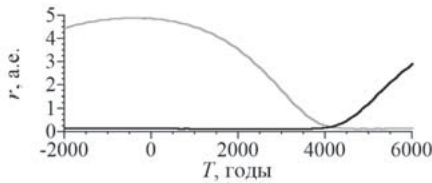


Рис. 4. Астероид 2012 US68: расстояние от Солнца до нисходящего (черный цвет) и восходящего (серый цвет) узла орбиты

Вековые резонансы

В то время как орбитальные резонансы способствуют сохранению взаимного расположения тел на орбитах, вековые отвечают за положения орбит в пространстве, поскольку обусловлены соизмеримостями между скоростями прецессий орбит астероида и планеты и зависят от аргумента перицентра и долготы восходящего узла. Эти переменные являются медленно меняющимися, поэтому период вековых резонансов существенно больше.

Методика выявления вековых резонансов подробно описана в работах [12, 13]. Рассмотрим здесь основные понятия. Аргумент возмущающей функции однократно и двукратно осредненной ограниченной задачи трех тел имеет следующий вид:

$$\underline{\underline{\psi}} = (l - 2p' + q')M' + (l - 2p)\omega + (l - 2p')\omega' + j(\Omega - \Omega'), \quad (1)$$

$$\underline{\underline{\psi}} = (l - 2p)\omega + (l - 2p')\omega' + j(\Omega - \Omega'), \quad (2)$$

где $\omega = \omega_0 + \dot{\omega}(t - t_0)$, $\Omega = \Omega_0 + \dot{\Omega}(t - t_0)$ — аргумент перицентра и долгота восходящего узла астероида; $M' = M'_0 + n'(t - t_0)$, $\omega' = \omega'_0 + \dot{\omega}'(t - t_0)$, $\Omega' = \Omega'_0 + \dot{\Omega}'(t - t_0)$ — средняя аномалия, аргумент перицентра и долгота восходящего узла планеты; p, p', q, q', l, j — целые числа. Тогда условие резонанса запишется следующим образом:

$$\underline{\underline{\dot{\psi}}} \cong 0. \quad (3)$$

Перебирая различные значения целых чисел, получим следующий спектр резонансных соотношений до 6-го порядка (табл. 1). Отдельную задачу представляет собой вычисление производных по времени от аргумента перицентра и долготы восходящего узла. Возможны как минимум два пути ее решения: по производным от полиномов Лагранжа [14] и с использованием уравнений Ньютона—Эйлера [15].

Соотношения 1—16 описывают смешанный вековой резонанс (апсидально-нодальный), соотношение 17 — чисто нодальный, а 18, 19 — апсидальные резонансы. Соотношение 20 представляет собой геометрический резонанс типа Лидова—Козаи. Этот резонанс интересен тем, что зависит только от взаимного расположения объектов и не связан с частотами движения возмущающих тел. По аналогии с орбитальными резонансами можно говорить о наличии резонанса при выполнении двух условий — малости резонансного соотношения

Таблица 1. Типы апсидально-нодальных резонансных соотношений

| № | Тип резонансного соотношения | № | Тип резонансного соотношения |
|----|---|----|---|
| 1 | $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + \dot{\omega} - \dot{\omega}'_i$ | 11 | $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + \dot{\omega}$ |
| 2 | $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - \dot{\omega} + \dot{\omega}'_i$ | 12 | $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - \dot{\omega}$ |
| 3 | $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + 2\dot{\omega} - 2\dot{\omega}'_i$ | 13 | $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + \dot{\omega}'_i$ |
| 4 | $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - 2\dot{\omega} + 2\dot{\omega}'_i$ | 14 | $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - \dot{\omega}'_i$ |
| 5 | $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + \dot{\omega} + \dot{\omega}'_i$ | 15 | $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - 2\dot{\omega}'_i$ |
| 6 | $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - \dot{\omega} - \dot{\omega}'_i$ | 16 | $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + 2\dot{\omega}'_i$ |
| 7 | $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + 2\dot{\omega} + 2\dot{\omega}'_i$ | 17 | $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i)$ |
| 8 | $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - 2\dot{\omega} - 2\dot{\omega}'_i$ | 18 | $\dot{\omega} - \dot{\omega}'_i$ |
| 9 | $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) + 2\dot{\omega}$ | 19 | $\dot{\omega} + \dot{\omega}'_i$ |
| 10 | $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_i) - 2\dot{\omega}$ | 20 | $\dot{\omega}$ |

и либрации резонансного аргумента. В трудных для классификации случаях также возможно использование фазовых портретов. Следует отметить, что при изучении большого числа объектов применение методов автоматического построения графиков и классификации на основе искусственного интеллекта существенно облегчает полный анализ всего спектра орбитальных и вековых резонансов.

Более подробно рассмотрим апсидально-нодальные резонансы на примере астероида 2012 US68. В табл. 2 представлены границы изменения резонансных соотношений с Юпитером. Видно, что все резонансные соотношения близки к нулю. Отметим, что соотношения для остальных планет отличаются незначительно от представленных.

В качестве примера на рис. 4 показаны эволюция резонансных соотношений (а, г) и аргументов (б, д), а также фазовые портреты (в, е) для резонанса № 16 с Землей и резонанса Лидова—Козаи. Резкие кратковременные изменения резонансного соотношения соответствуют тесным сближениям. Что касается резонансных аргументов, то можно заметить, что их изменения на рассматриваемом интервале времени значительно меньше 360° , но данное поведение нельзя

Таблица 2. Границы изменения резонансных соотношений

| № | $\dot{\psi}, '' / \text{сут.}$ | № | $\dot{\psi}, '' / \text{сут.}$ |
|----------|--------------------------------|----------|--------------------------------|
| 1, 5, 11 | (-1.5, 1.0) | 4, 8, 10 | (-28.2, 4.3) |
| 2, 6, 12 | (-19.3, 2.9) | 13–17 | (-10.4, 1.5) |
| 3, 7, 9 | (-2.3, 7.4) | 18–20 | (-1.4, 8.9) |

в полной мере считать либрацией, потому что они занимают менее одного периода. Тем не менее внешний вид фазового портрета подтверждает наличие резонанса. Похожее поведение демонстрируют и остальные резонансные характеристики.

Заключение

Орбитальные и вековые резонансы оказывают значительное влияние на движение астероидов, сближающихся с Землей. Устойчивый орбитальный резонанс способствует сохранению геометрической конфигурации «астероид—планета», а вековые резонансы определяют положение орбиты в пространстве. Резонансы являются весьма распространенным явлением среди АСЗ. В качестве примера: среди 40 астероидов с малым перигелийным расстоянием почти половина вовлечены в орбитальный резонанс с планетами, и для каждого объекта наблюдаются хотя бы некоторые из апсидально-нодальных соотношений.

Орбитальным резонансам среди АСЗ посвящено большое число работ. Не имея возможности в рамках данной публикации сделать подробный обзор, упомянем некоторые статьи этого года. В [16] рассмотрена пара астероидов, предположительно имеющих общее происхождение и движущихся в резонансе 3/5 с Венерой. Работа [17] посвящена изучению астероидов в резонансе с Землей, орбиты которых близки к плоскости эклиптики. Эти объекты справедливо привлекают внимание ученых, поскольку могут сближаться с нашей планетой не только в окрестности узлов. Авторы статьи [18] изучают потенциально опасные астероиды и отмечают, что резонансные объекты представляют меньшую угрозу для Земли.

Иная ситуация с изучением вековых резонансов. Несмотря на то что аналитическая теория вековых резонансов была применена к главному поясу еще в 1969 г. [19], подобные исследования для АСЗ

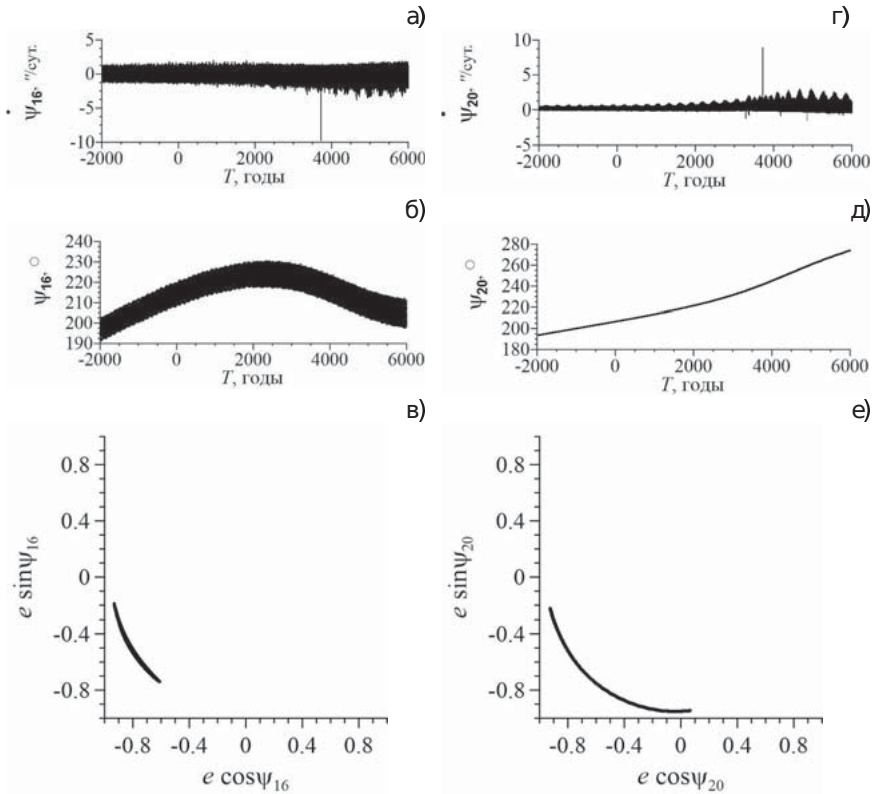


Рис. 5. Астероид 2012 US68: эволюция резонансных соотношений (а, г) и критических аргументов (б, д); фазовые портреты (в, е) для резонансов № 16 и 20 с Землей

начали появляться только в последние годы, их число пока очень мало. По-видимому, это связано с тем, что изучать движение АСЗ аналитическими методами невозможно, а при численном интегрировании тесные сближения приводят к снижению точности, что делает весьма непростым проведение исследований на длительных интервалах времени.

Авторы работы [20] рассматривают семейство Флоры в вековом резонансе ν_6 , которое может быть источником АСЗ. В статье [21] изучается долгопериодическая эволюция астероида 2013 RB6, движущегося в вековом резонансе ν_5 , но вдали от орбитальных резонан-

сов. Отметим, что резонанс ν_6 соответствует резонансу с Сатурном № 18 в нашей терминологии, а ν_5 — тому же резонансу с Юпитером. В нашей работе [14] исследована короткопериодическая эволюция астероидов, проходящих через сферу тяготения Земли; показано, что все рассматриваемые объекты находятся в вековых резонансах.

Отдельно следует отметить некоторые сложности исследования резонансного движения, связанные с обилием графического материала, которые требуется анализировать как визуально, так и численно. Особенно явно эта проблема проявляется при необходимости исследовать движение большого числа объектов или тестовых частиц. На помощь здесь приходят как автоматизация построения графиков, так и машинный анализ данных [22].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-10022).

Библиографические ссылки

1. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра /ред. Б. М. Шустов, Л. В. Рыхлова. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2010. — С. 348.
2. Емельяненко В. В., Попова О. П., Чугай Н. Н. и др. Астрономические и физические аспекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // Астрон. вестн. — 2013. — Т. 47, вып. 4. — С. 262—277.
3. Мюррей К., Дермотт С. Динамика Солнечной системы. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. — С. 588.
4. Галушина Т. Ю. Динамика резонансных астероидов // Физика космоса : тр. 45-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 1—5 февр. 2016 г. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. — С. 43—58.
5. *Bowell E., Muinonen K., Wasserman L. H.* A public-domain asteroid data base // In *Asteroids, Comets, Meteors*, Kluwer, Dordrecht, Netherlands. — 1994. — P. 477—481.
6. Быкова Л. Е., Галушина Т. Ю. Прикладной программный комплекс «ИДА» для исследования динамики астероидов // Изв. вузов. Физика. — 2012. — Т. 55, вып. 10/2. — С. 89—96.
7. *Galushina T., Bykova L., Letner O., Baturin A.* IDA software for investigating asteroid dynamics and its application to studying the motion of 2012 MF7 // *Astronomy and Computing*. — 2019. — Vol. 26.
8. Гринберг Р. Орбитальный резонанс в движении естественных спутников // Спутники планет / ред. Дж. Бернс. — М., 1980. — С. 189—202.
9. Гребеников Е. А., Рябов Ю. А. Резонансы и малые знаменатели в небесной механике. — М. : Наука, 1978. — С. 128.

10. *Galushina T. Yu., Ryabova G. O., Skripnichenko P. V.* The force model for asteroid (3200) Phaethon // Planetary and Space Science. — 2015. — Vol. 118. — P. 296–301.
11. *Farnocchia D., Chesleya S. R., Vokrouhlický D. V. et al.* Near Earth Asteroids with measurable Yarkovsky effect // Icarus. — 2013. — Vol. 224. — P. 1–3.
12. *Бордовицына Т. В., Томилова И. В., Чувашов И. Н.* Влияние вековых резонансов на долговременную орбитальную эволюцию неуправляемых объектов спутниковых радионавигационных систем в области МЕО // Астрон. вестн. — 2012. — Т. 46, вып. 5. — С. 356–368.
13. *Galushina T. Yu., Sambarov G. E.* The dynamical evolution and the force model for asteroid (196256) 2003 EH1 // Planetary and Space Science. — 2017. — Vol. 142. — P. 38–47.
14. *Летнер О. Н., Галушина Т. Ю.* Поиск вековых резонансов в динамике нумерованных астероидов, проходящих через сферу тяготения Земли в ближайшие 200 лет // Астрон. вестн. — 2019. — Т. 53, вып. 1. — С. 24–33.
15. *Попандопуло Н. А., Александрова А. Г., Бордовицына Т. В.* Численные модели движения искусственных спутников Земли и Луны и возможности их использования : тез. докл. XI Междунаро. науч. конф. «Околоземная астрономия и космическое наследие», Казань, 30 сент. — 4 окт. 2019 г. — 2019. — С. 86–87.
16. *Fuente Marcos de la C., Fuente Marcos de la R.* Dancing with Venus in the shadow of the Earth: a pair of genetically related near-Earth asteroids trapped in a mean-motion resonance // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters. — 2019. — Vol. 483, iss. 1. — P. L37–L41.
17. *Qi Y., Ruiter de A.* Planar near-Earth asteroids in resonance with the Earth // Icarus. — 2019. — Vol. 333. — P. 52–60.
18. *Li M., Huang Y., Gong S.* Assessing the risk of potentially hazardous asteroids through mean motion resonances analyses // Astrophysics and Space Science. — 2019. — Vol. 364, iss. 5. — P. 12.
19. *Williams J. G.* Secular perturbations in the Solar System. Ph. D. Dissertation. — Los Angeles : University of California, 1969.
20. *Vokrouhlický D., Bottke W. F., Nesvorný D.* Forming the Flora Family: Implications for the Near-Earth Asteroid Population and Large Terrestrial Planet Impactors // Astrophysics and Space Science. — 2017. — Vol. 153, iss. 4. — P. 23.
21. *Емельяненко В. В., Емельяненко Н. Ю.* Долгоживущий околоземный астероид 2013 RB6 // Астрон. вестн. — 2018. — Т. 52, вып. 1. — С. 70–72.

22. Красавин Д. С., Александрова А. Г., Томилова И. В. Применение искусственных нейронных сетей в задачах анализа динамической структуры околоземного орбитального пространства : тез. докл. XI Международ. науч. конф. «Околоземная астрономия и космическое наследие», Казань, 30 сент. — 4 окт. 2019 г. — 2019. — С. 62–63.